

# ワイヤー素子を挿入した垂直管における凝縮熱伝達の増加(PP22)

Briggs A., Queen Mary and Westfield College & Polley G.T., Cal Gavin Limited

**抄録:** 立体ワイヤー挿入体を用いた凝縮熱伝達の増強に関する実験研究の結果である。装置と実験手順が詳述されている。2相の圧力降下と熱伝達の予測の相関が研究された。これらは増強された凝縮器のための、普遍的な設計手順の基礎を形成する。

## 緒言

長い間、熱伝達促進に対する研究が実施されてきた。だが未だに工業的なその使用は非常に限定されている。この内、経営者が既存のそれからのより良い性能を得る方法を探している段階で、むしろ新プラントを形成する方が経済的であることによって落胆するためである。別の観点からみれば、ユーザーの経験の成長の中で、幾つかの独占的考案の成果において、機密が増加するためとも言える。

今広範囲に使われている一つの機器は hiTRAN 立体ワイヤー挿入体である。この機器は単相条件下で非常に広範囲に適用されてきた。(Polley 等(1994)参照) ここでは、垂直管の純粋蒸気の凝縮の増加にそれを使用した最初の結果を紹介する。実験装置と手順も記述されている。関係式が研究された。これらの関係式は方法論確立の基礎となる。したがってこの研究が、普遍的な凝縮器の設計方法論の開発の基礎となることを期待されている。

## 実験装置

実験に使われた装置を図 1 に示す。蒸気は、それぞれが定格 3kw の 4 つの SUS シーズ浸漬ヒーターが装着されたガラス製ボイラーで発生させられた。ボイラーからの蒸気は SUS パイプの中を上昇し、180 度のベントを通過して垂直の凝縮管 (25.4mm o.d.、20.8mm i.d.、750mm 長さ) に達する。増強の実験では、この管には 5A8/D の hiTRAN 挿入体が装着された。この凝縮器は円筒状の冷却ジャケット内の水の上昇流によって、外部から冷却された。入口と出口には冷却ジャケットと連結管から試験用管を断熱するために、PTFE 軸受が用いられた。試験用セクションからの過剰の蒸気は、水で冷却される外部フィン付きの予備凝縮器に通された。2 つのユニットからの凝縮液は重力によって、ボイラーに返された。

この試験用管の平均の熱貫流は、冷却媒体の流量と温度上昇から計算された。流量は可変開口のフロート型流量計を用いて、温度は 0.01K の精度を持つ 10 連の熱電堆で測定された。

冷媒入口と出口にある特別な混合容器は、冷媒の良い混合を確実にし、測定点での熱電対端子の等温浸漬を適切にしている。

壁面温度は、壁面に設置された 3 か所の熱電対 (出口から 187.5mm、375mm と 562.5mm) によって測定された。内壁表面と熱電対の位置の間の温度降下に基づく僅かな測定値の修正が適用された。この蒸気側の熱伝達係数の計算に使われる壁面温度は、3 か所の内壁温度の算術平均である。

試験用管の入り口部分の蒸気速度は、(予め周囲への損失を決定してある) ボイラーヒーターへの電力供給から計算された。ボイラー内と試験用管の入口、出口の蒸気温度は SUS チューブに挿入された熱電対で測定された。ボイラーのゲージ圧は、試験流体 (CFC-113) で満たされた U チューブ型マンオメーターで測定された。

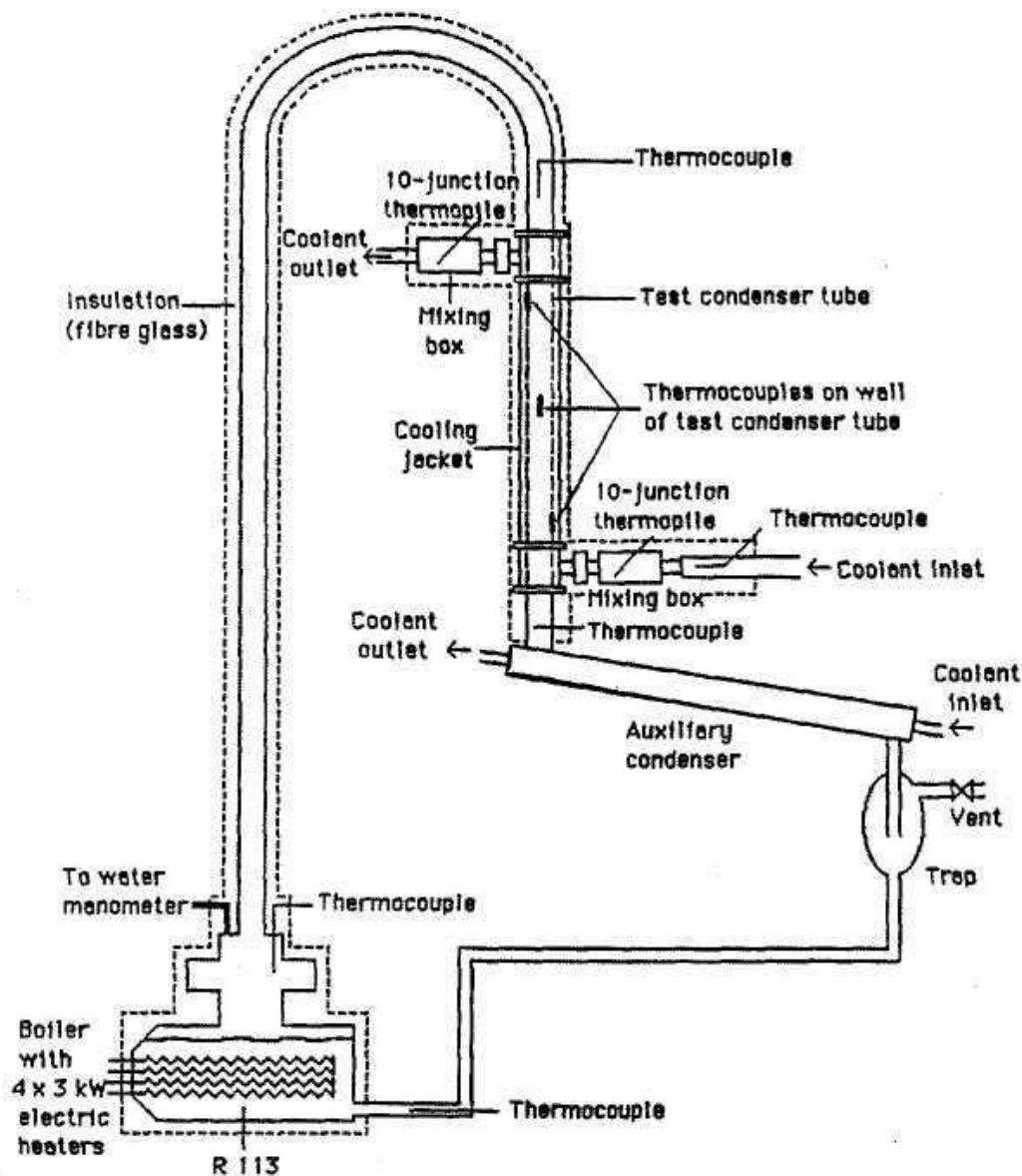


図 1. 管内凝縮試験装置の図面

この試験凝縮器を横切る圧力降下は、スライド式副尺付きの U チューブマノメーター（1~5mm で変化する余計な変動を修正するための）で測定された。U チューブの底部のドレインは、精密調整バルブ付きで、凝縮液がボイラーへ繋がっている。ドレインの速度は、読み取りの安定する水準に保つために、調節される。圧力損失が大きいたときには変動が強く、そのため圧力損失の測定の比較精度はおおむね一定である。（最も低い蒸気流量で冷媒の流量の最大の時に起こる最も低い圧力損失の場合を除けば、それは約 5% 程度である。）

### 実験方法

測定を開始する前に、スタートアップ時の余分な空気を追い出すために、この装置は少なくとも 30 分間運転された。空気濃度は測定圧力における飽和蒸気温度を比較することによって検定された。全ての場合、空気の濃度は 0.2 質量% 以下であることを示した。全ての実験は、装置内への空気の侵入を防ぐため、大気圧より若干高い状態で実施された。

熱伝達実験 2つの入口蒸気速度 (3.5 と 5m/s) で実施された。測定は異なった日にそして挿入体は取り除いて再設置し、繰り返された。非常に良い再現性が得られた。

圧力損失の測定は 5つの入口蒸気速度と凝縮熱貫流範囲で実施された。

## 実験結果

### 1、熱伝達

結果を図 2 に示す。異なる記号は異なった 3日 で試験を実施した結果を示す。下部のラインはプレーンチューブ (平滑管) での凝縮に関係づけられる。上部 2つのラインは挿入体を装着した場合である。増強管は係数にして 50-60%の増加を示している。これらのラインは次式に合うように描かれている。

$$\alpha = k \Delta T^{-1/4} \quad (1)$$

この膜温度差への依存性は、凝縮プロセスにおいて重力が顕著な役割を果たしていることを推測させる。入口速度で分割したデータは蒸気せん断力の効果もまた大きいことを示している。

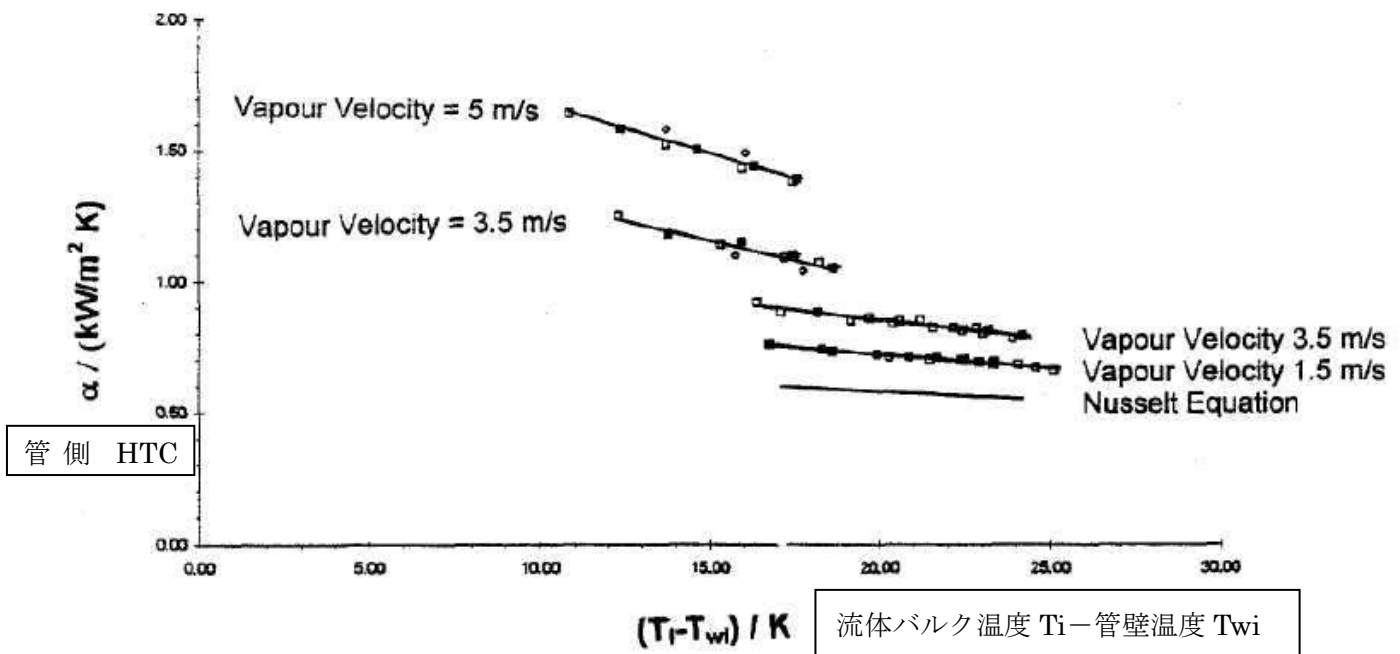


図 2. 熱伝達係数と管内温度差の関係

### 2、圧力降下 (圧損)

2相系の圧力降下のデータもまた得られた。これらは低くなることを見出された。最高値は 2500Pa 丁度 19mmHg である。これは最高速度 (6.5m/s) で最低熱貫流 (25000W/sq.m.) において得られた。熱貫流の増加に伴い、運動量回復の増加の結果として、総圧損は低下する。

## 結果の相関

### 1、平滑管の熱伝達

この実験データは、重力とせん断力の両方が顕著であるという古典的領域に陥る。Butterworth (1983)はこの状況に関して、簡単な補完式を推奨している：

$$\alpha = (\alpha_g^2 + \alpha_s^2)^{1/2} \quad (2)$$

ヌッセルト相関式(1916)は重力制御係数の決定に使用された。うねり効果による幾らかの増加は無視された。

せん断制御係数の決定のために、数多くの手法を使うことが出来た。最初の方法は、Boyko-Kruzhilin (1967)の式の試みであった。これは、予想の係数と実験結果とを 10%以内で良く一致させた。

代わりの手法は運動/熱伝達理論 (momentum/heat transfer analogy) の適用である。R.G. Owen, Hewitt et al (1994)による解析に基づけば、Chen (1966)の強制対流式が蒸発と凝縮両方の熱伝達の予測に使うことが出来ることを、提唱している。上記理論を使って、Chen は 2 相の強制対流熱伝達係数の予測のために、次式を提案している。

$$\alpha_{TP} = \alpha_L \left( \frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_L} \right)^{0.443} \quad (3)$$

これは、両方の熱伝達係数、摩擦係数はレイノルズ数と power law?を通して関連付けられる中で、他の幾何学形状のために、一般化することが出来る。一般化式は：

$$\alpha_{TP} = \alpha_L \left( \frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_L} \right)^{b/(2-n)} \quad (4)$$

ここで、 $b$ は、熱交換式の中のレイノルズ指数で、 $n$ は摩擦係数相関式での指数である。

せん断制御係数のためのこの手法の使用は、また良い予測を提供した。この方法は、2 から 18%の範囲の予測を生じる。

### 2、増強管の性能 (圧損)

圧損のデータは、ワイヤー挿入体を含む実験の間、収集された。運動量回復効果のための次の修正は、先に示した Chisholm 式 (1967) を使ったデータと同等であった：

$$\left( \frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_L} \right) = 1 + \frac{C}{X_{tt}} + \frac{1}{X_{tt}^2} \quad (5)$$

### 2、増強管の性能 (熱伝達)

平滑管性能の予測に適用された運動量理論手法は、増強管にも拡張された。結果は図 3. に示す。比較範囲は予測の 5%以上と予測の 25%以下である。

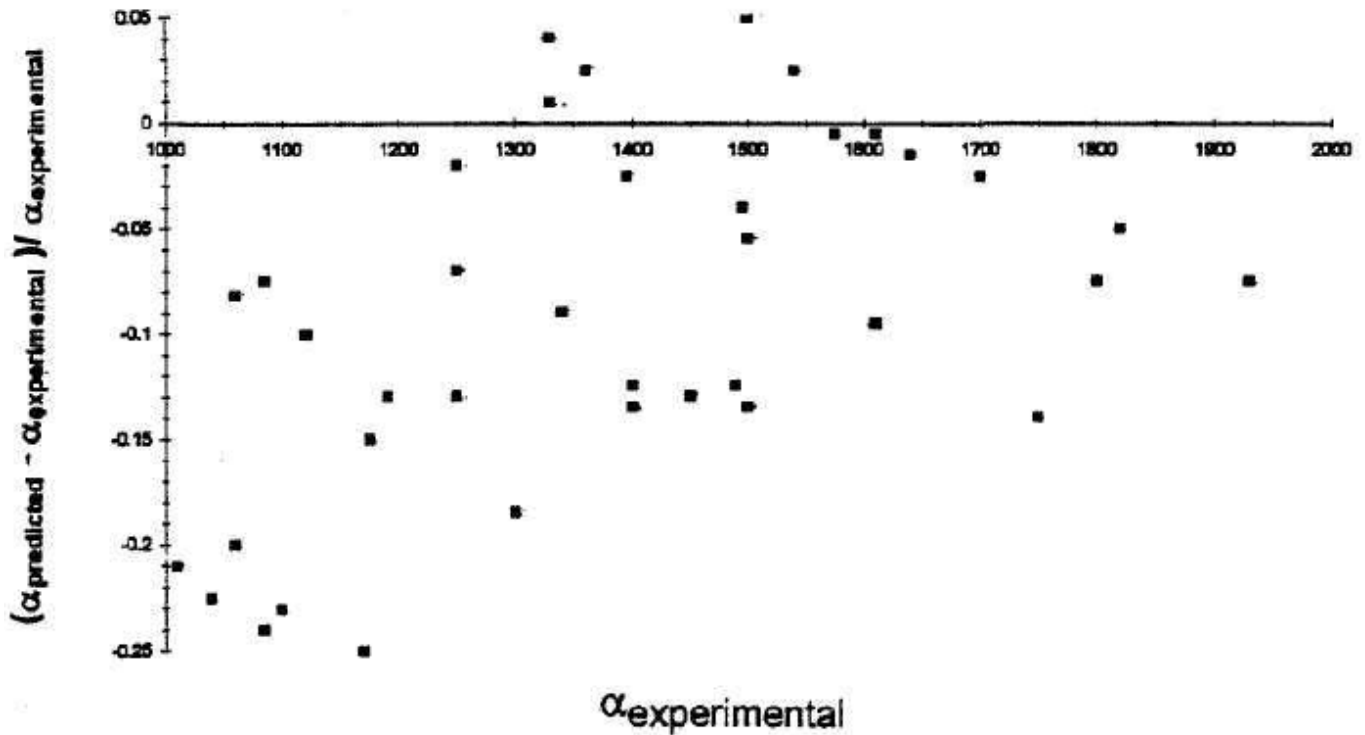


図 3. 熱伝達増強のための相関 (せん断：Chen の拡張)

#### まとめ

hiTRAN 挿入体を使った凝縮増強の一つの実験研究は、顕著な促進の達成されることを示した。その範囲は蒸気速度 3.5m/s の時に 48%の係数の増加で、5m/s の速度では 64%の増加である。

この実験は重力とせん断効果両方の著しい条件のもとで実施された。平滑管の結果は Butterworth による補完式と良く一致した。

Boyko-Kruzhilin 相関式あるいは Chen による運動/熱伝達理論のどちらを使っても、平滑管のせん断係数は計算出来た。

Chen の式は増強管の場合にも容易に拡張できた。この方法は良い予測を再度もたらす。

増強管のための 2 相系の圧力降下データは、Chisholm の式を使うことで良い相関が得られた。

増強管性能の予測への拡張は、既定のモデルを使って実施されたが、この生み出された方法論は普遍的である。それは他の幾何形状の挿入体にも適用されるべきである。それは凝縮のように、蒸発熱伝達にも適用されるべきである。

実験研究は他の幾何形状挿入体の検討と挿入体存在下での凝縮に向かおうとしている。流体沸騰増強の研究もまた実施中である。

## 文献

- 1) Boyko L.D. & Kruzhilin G.N., "Heat transfer and hydraulic resistances during condensation of steam in a horizontal tube and in a bundle of tubes", *Int.J.Heat Mass Trans.* 1967,10361
- 2) Butterworth D., "Condensation of Pure Vapours" in *Heat Exchanger Design Handbook*, Hemisphere Publishing, New York, Chapter 2.6
- 3) Chen J.C., "Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow", *Ind.Eng. Chem/Proc. Des. Dev.* 1966,5,322
- 4) Chisholm D., "A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two phase flow", *Int.J.Heat Mass Transfer*, 1967,10,1767
- 5) Hewitt G.F., Shires G.L. & Bott T.R. in *Process Heat Transfer*, CRC Press Inc., Boca Raton, 1994
- 6) Nusselt W., "Surface condensation of water vapour", *V.D.I.* 1916, 60(27),541
- 7) Polley G.T., Nasr J. & Terranova A., "Determination and Application of the Benefits of Heat Transfer Enhancement", *Trans.Inst.Chem.Engrs.*, 1994,72A,616

CalGavinJapan shojisakai